

Данный текст является русскоязычной версией опубликованной на английском языке статьи и представлен в авторской редакции только на данном сайте!

UDC 621.316.722

Doi: 10.31772/2587-6066-2020-21-3-400-408

For citation: Lobanov D. K., Mizrah E. A., Samotik L. A., Tkachev S. B., Shtabel N. V. Energy saving simulation test complex for spacecraft power supplies full-scale electrical tests. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2020, Vol. 21, No. 3, P. 400–408. Doi: 10.31772/2587-6066-2020-21-3-400-408

Для цитирования: Энергосберегающий имитационно-натурный комплекс для электрических испытаний систем электропитания космических аппаратов / Д. К. Лобанов, Е. А. Мизрах, Л. А. Самотик и др. // Сибирский журнал науки и технологий. 2020. Т. 21, № 3. С. 400–408. Doi: 10.31772/2587-6066-2020-21-3-400-408

ENERGY SAVING SIMULATION TEST COMPLEX FOR SPACECRAFT POWER SUPPLIES FULL-SCALE ELECTRICAL TESTS

D. K. Lobanov, E. A. Mizrah*, L. A. Samotik, S. B. Tkachev, N. V. Shtabel

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: enis-home@mail.ru

The aim of this paper is to describe an energy saving automatized simulation test complex used for spacecraft power supplies full-scale electrical ground-based tests. The complex allows you to simulate the operation of solar array, lithiumion-battery and spacecraft payload. The distinctive features of the test complex are a continuous and impulse control methods combination with an improved dynamic accuracy, and recuperation of consumed energy into its internal DC network for the better energy efficiency. Test complex operational time from uninterruptible power supply accumulator batteries is significantly increased due to the recuperation of excess power into the test complex internal DC network. The results are experimentally proved. The authors of the paper analyzed dynamic accuracy improvement and energy saving during ground-based spacecraft power system electrical tests. The process of ground-based spacecraft electrical testing includes the following tasks:

- the accurate simulation of static and dynamic characteristics of spacecraft power system energy sources and loads;*
- the utilization of energy produced by power system under load and during spacecraft battery charge simulation.*

The paper deals with the description of energy saving automatized simulation test complex (ESAST) including complex subsystems structure and experimental study of the test complex characteristics. Commercially available simulation test complexes usually use continuous or impulse control methods. The continuous control methods decrease energy efficiency, as the most part of energy is dissipated on the regulator, which requires massive heat sink, increasing weight and size. It makes difficult to produce high-power test complexes. The impulse control methods provide better energy efficiency, but limit dynamics and real devices fast response reproduction accuracy. The paper describes the combination of continuous and impulse control methods with the aim of taking the advantages of both. The energy consumed by the test complex can be utilized either by the heat dissipation in the environment or by the recuperation into industrial AC grid. The heat dissipation reduces the energy efficiency, increases the testing room temperature (in case of

high-power spacecraft power system) and an air conditioning system. The recuperation into AC grid is free of specified disadvantages, but it requires the recuperated excess energy parameters matching with AC grid requirements through the network of grid-tied inverters, which leads to the increase of weight and size of the test complex. Moreover, the recuperation into AC grid is difficult during grid emergency shutdown, which can result in long test failure. The paper describes the method of excess energy recuperation into the complex internal DC network. The method significantly reduced test complex energy consumption, which in case of powering test complex from uninterruptible power supply (UPS) notably increase operating time from UPS accumulator batteries during AC grid emergency shutdown.

In conclusion the main advantages of ESAST are given:

- more than twice wattage reduction of test complex main power supply;
- the ability to work during AC grid emergency shutdown with increased operating time from UPS;
- the significant reducing of ESAST main parts weight and size.

Keywords: solar array simulator, battery simulator, electronic load, power supply system, energy saving.

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ ИМИТАЦИОННО-НАТУРНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Д. К. Лобанов, Е. А. Мизрах*, Л. А. Самотик, С. Б. Ткачев, Н. В. Штабель

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: enis-home@mail.ru

В работе рассмотрен автоматизированный энергосберегающий имитационно-натурный комплекс, предназначенный для наземных испытаний систем электропитания космических аппаратов. Комплекс позволяет имитировать работу солнечной батареи, аккумуляторной батареи и бортовой нагрузки. Отличительной особенностью комплекса является комбинирование непрерывных и импульсных методов управления и использование рекуперации потребленной энергии в собственную сеть постоянного тока с целью повышения динамической точности и повышения коэффициента полезного использования энергии. Также рекуперация в сеть постоянного тока снижает энергопотребление комплекса, что при использовании источника бесперебойного питания (ИБП) позволяет увеличить время работы комплекса от аккумуляторов ИБП.

В статье рассматриваются вопросы повышения динамической точности и снижения энергопотребления при проведении наземных электрических испытаний систем электропитания (СЭП) космических аппаратов (КА). В ходе наземных электрических испытаний СЭП КА возникают следующие задачи:

- необходимо достаточно адекватно воспроизводить статические и динамические свойства как источников энергии СЭП КА, так и потребителей;
- при энергонагрузке СЭП и имитации заряда бортовой аккумуляторной батареи (АБ) необходимо утилизировать потребленную энергию.

Статья представляет собой описание автоматизированного энергосберегающего имитационно-натурного комплекса (ЭИНК), структур его подсистем, экспериментальное подтверждение характеристик. Приведен внешний вид ЭИНК.

Промышленно выпускаемые имитационно-натурные комплексы, как правило, используют непрерывные или импульсные методы управления. Использование непрерывных методов управления снижает коэффициент полезного использования энергии, поскольку относительно большая часть энергии рассеивается в виде тепла на регулирующих элементах, а также приводит к увеличению массогабаритных показателей из-за необходимости применения теплоотводов. Это затрудняет создание мощных имитационно-натурных комплексов. Использование импульсных методов управления обеспечивает высокое значение коэффициента использования энергии, однако не позволяет получить высокого быстродействия и адекватного воспроизведения быстропротекающих процессов реальных устройств. В данной статье рассмотрено комбинирование непрерывных и импульсных методов управления, что позволяет объединить их преимущества. Для утилизации избыточной энергии в промышленно выпускаемых имитационно-натурных комплексах используется или рассеивание энергии в виде тепла или рекуперация в промышленную сеть переменного тока.

Сброс избыточной энергии в виде тепла снижает коэффициент полезного использования энергии, приводит к повышению температуры в помещении (при испытании мощных СЭП), может потребовать систем вентиляции и кондиционирования воздуха. Рекуперация энергии в сеть переменного тока лишена этих недостатков. Однако она требует согласования параметров рекуперированной энергии с требованиями промышленной сети посредством ведомых сетью инверторов, что приводит к ухудшению массогабаритных показателей комплекса. Кроме того, рекуперация в сеть переменного тока затруднена при аварийном отключении сети. Это может привести к срыву длительных испытаний. В данной статье рассмотрен метод рекуперации избыточной энергии в собственную сеть постоянного тока комплекса. При этом снижается энергопотребление комплекса, что при использовании источников бесперебойного питания (ИБП) повышает время работы ЭИНК от аккумуляторов ИБП при аварийном отключении сети переменного тока.

В выводах статьи подчеркивается, что разработанный ЭИНК обладает следующими преимуществами:

- возможность уменьшения мощности источника электропитания комплекса минимум в два раза;*
- сохранение работоспособности и увеличение длительности работы от источника бесперебойного питания при отключении промышленной сети переменного напряжения;*
- существенное уменьшение массы и габаритов составных частей ЭИНК.*

Ключевые слова: имитатор солнечной батареи, имитатор аккумуляторной батареи, нагрузочное устройство, система электропитания, энергосбережение.

Введение. Для проведения наземных испытаний систем электропитания (СЭП) космических аппаратов (КА) используются имитационно-натурные комплексы (ИНК), в состав которых входят имитаторы первичного источника энергии (солнечной батареи), аккумуляторной батареи, различные нагрузочные устройства. Для обеспечения требуемого качества испытаний имитаторы должны воспроизводить с достаточно высокой точностью статические и динамические характеристики прототипов.

При создании ИНК мощных (свыше 10 кВт) энергосистем КА и проведении длительных (ресурсных) испытаний возникают две проблемы:

- обеспечение требуемой точности имитации статических и динамических характеристик источников электроэнергии СЭП, что важно для адекватности проводимых испытаний;

– энергосбережение и уменьшение тепловыделений подсистемами комплекса, что важно для улучшения функциональных, эксплуатационных характеристик комплекса, массы и габаритов.

В существующих ИНК первая проблема решается применением непрерывных законов управления [1–3], что приводит к низкому коэффициенту использования электроэнергии (не более 50 %) и, как следствие, к большим тепловыделениям.

При решении второй проблемы используют импульсные методы управления [4] и рекуперацию электроэнергии в сеть переменного тока. При этом ухудшаются динамические характеристики имитаторов, а при обеспечении требований к качеству электроэнергии, усложняются схемы рекуператоров и увеличивается их стоимость. В последнее время с целью улучшения качества электропитания комплексов используются источники бесперебойного питания (ИБП). Но, даже в этом случае, при аварийном отключении сети переменного тока рекуперация становится невозможной, что является существенным недостатком этого способа.

В данной работе предложено решение указанных проблем: обеспечение требуемых динамических свойств и повышение использования энергии в мощных ИНК.

Для решения указанных проблем в энергосберегающем ИНК (ЭИНК), разработанном авторами, используются следующие новые подходы:

– комбинация импульсных и непрерывных методов управления имитаторами энергоустановок и подсистем СЭП, что позволяет повысить коэффициент использования электроэнергии и обеспечить требуемые динамические свойства имитаторов;

– рекуперация избыточной электроэнергии нагрузочных устройств в сеть постоянного тока системы электроснабжения комплекса, что позволяет повысить коэффициент использования электроэнергии, существенно уменьшить энергопотребление из сети переменного тока, уменьшить мощность источника электропитания ЭИНК и увеличить время работы ЭИНК от аккумуляторных батарей ИАП при отключении сети переменного тока.

Структура предлагаемого устройства. На рис. 1 представлена структурная схема ЭИНК [5], поясняющая использование метода рекуперации электроэнергии в сеть постоянного тока.

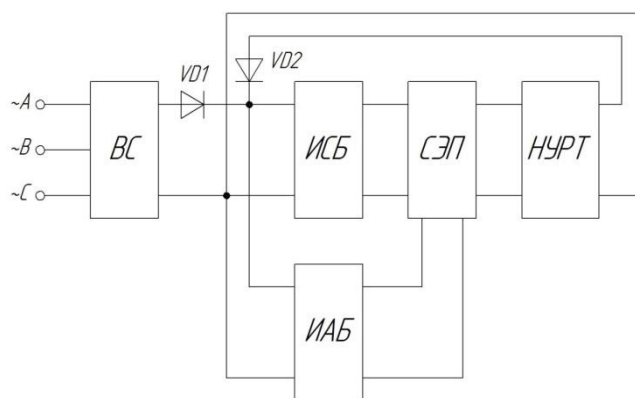


Fig. 1. ESAST structure:

RS – rectifier stabilizer, SAS – Solar array simulator, PS – tested power supply, LDERS – load device with energy recuperation, LibS – Lithium-ion-battery simulator

Рис. 1. Структурная схема модуля ЭИНК:

BC – выпрямитель-стабилизатор; ИСБ – имитатор солнечной батареи; СЭП – испытываемая система электропитания; НУРТ – нагрузочное устройство рекуперативного типа; ИАБ – имитатор аккумуляторной батареи

В первом режиме работы (освещенный участок траектории полета КА, заряд АБ) СЭП получает электроэнергию от ИСБ и осуществляет питание нагрузки и заряд ИАБ. НУРТ задает режим энергонагружения СЭП и возвращает потребленную энергию в общую сеть питания постоянного тока ЭИНК. ИАБ работает в режиме имитации заряда АБ и осуществляет рекуперацию избыточной энергии в общую сеть питания постоянного тока ЭИНК.

Во втором режиме работы СЭП (теневой участок траектории полета КА) ИСБ прекращает электропитание СЭП. ИАБ работает в режиме имитации разряда АБ и осуществляет электропитание СЭП. НУРТ задает режим энергонагружения СЭП и возвращает потребленную энергию в общую сеть питания постоянного тока ЭИНК.

В третьем режиме работы (освещенный участок траектории полета КА, пик мощности энергопотребления) электропитание СЭП осуществляется от ИСБ и ИАБ совместно. ИАБ также, как и в предыдущем случае работает в режиме имитации разряда АБ. НУРТ задает режим энергонагружения СЭП и возвращает потребленную энергию в общую сеть питания постоянного тока ЭИНК.

К достоинствам данного варианта структуры ЭИНК следует отнести относительно простую реализацию НУРТ, рекуперирующего потребленную энергию в одну общую для ИСБ и ИАБ сеть питания, и относительно высокие удельные энергетические характеристики ИАБ, использующего двунаправленный импульсный преобразователь (ИП).

Комбинирование импульсных и непрерывных методов управления имитаторами, позволяющее при относительно высоком коэффициенте полезного использования энергии обеспечить высокие динамические характеристики, заключается в следующем. Имитаторы (ИСБ, ИАБ и НУРТ) содержат быстродействующие непрерывные регуляторы, обеспечивающие регулирование выходного параметра имитатора (напряжение, ток, мощность и т.п.), и импульсные регуляторы, ограничивающие мощность рассеивания на непрерывных регуляторах и повышающие коэффициент полезного использования энергии.

Имитатор солнечной батареи. Основу ИСБ (рис. 2) составляет непрерывный стабилизатор тока (НСТ) с параллельным включением регулирующего элемента (НРЭ). НСТ состоит из следующих устройств: НРЭ, УС1, ДТ1. Для воспроизведения требуемых нелинейных вольтамперных характеристик СБ, НСТ охвачен функциональной обратной связью по напряжению (УФОС). Применение импульсного стабилизатора тока (ИСТ), протекающего через НРЭ, позволяет ограничить мощность рассеиваемую НРЭ. ИСТ состоит из следующих устройств: ИП, ШИМ, УС2, ДТ2, ИОН.

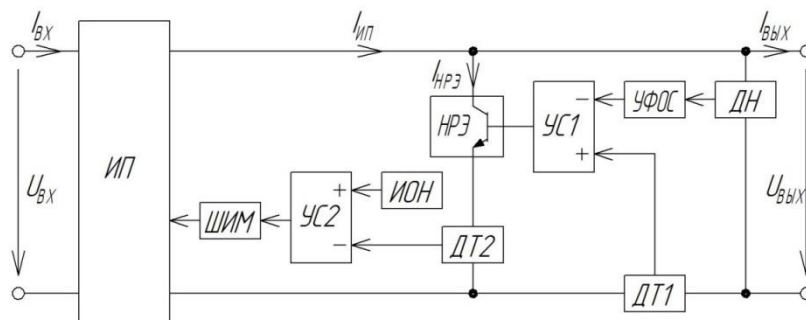


Fig. 2. Solar array simulator structure:

PC – pulse converter; PWM – pulse width modulation; SA – summing amplifier; Vref – voltage reference; ACE – analogue control element; FFD – functional feedback; VD – voltage divider; CS – current sensor

Рис. 2. Структурная схема ИСБ:

ИП – импульсный преобразователь; ШИМ – широтно-импульсный модулятор; УС – усилитель-сумматор; ИОН – источник опорного напряжения; НРЭ – непрерывный регулирующий элемент; УФОС – устройство функциональной обратной связи; ДН – датчик напряжения, ДТ – датчик тока

Принцип работы ИСБ: УС1 сравнивает напряжение с ДТ1, пропорциональное выходному току ИСБ, с напряжением на выходе УФОС и формирует сигнал управления для НРЭ. УФОС вырабатывает уставку для НСТ в соответствии с заданной вольтамперной характеристикой (ВАХ) и текущим значением напряжения, измеренным ДН. УС2 сравнивает с опорным (ИОН) напряжение, пропорциональное току через НРЭ, полученное с ДТ2, и формирует управляющий сигнал для ИП, пропорциональный отклонению тока через НРЭ от требуемого значения.

Имитатор аккумуляторной батареи. Основу ИАБ (рис. 3) [6] составляет непрерывный стабилизатор напряжения (НСН) с параллельным включением НРЭ. НСН состоит из следующих устройств: НРЭ, УС1, ДН. Для воспроизведения требуемых нелинейных зарядно-разрядных характеристик АБ, НСН охвачен функциональной обратной связью по току (УФОС). Применение импульсного стабилизатора тока (ИСТ), протекающего через НРЭ, позволяет ограничить мощность рассеиваемую НРЭ. ИСТ состоит из следующих устройств: ДИП, ШИМ, УС2, ДТ2. ИОН.

Принцип работы ИАБ: УС1 сравнивает напряжение с ДН, пропорциональное выходному напряжению ИАБ, с напряжением УФОС и формирует сигнал управления для НРЭ. УФОС вырабатывает уставку для НСН в соответствии с заданной зарядно-разрядной характеристикой (ЗРХ) и текущим значением заряда, измеренным САЧ. УС2 сравнивает напряжение, пропорциональное току через НРЭ, полученное с ДТ2, с опорным и формирует управляющий сигнал для ДИП, пропорциональный отклонению тока через НРЭ от требуемого значения.

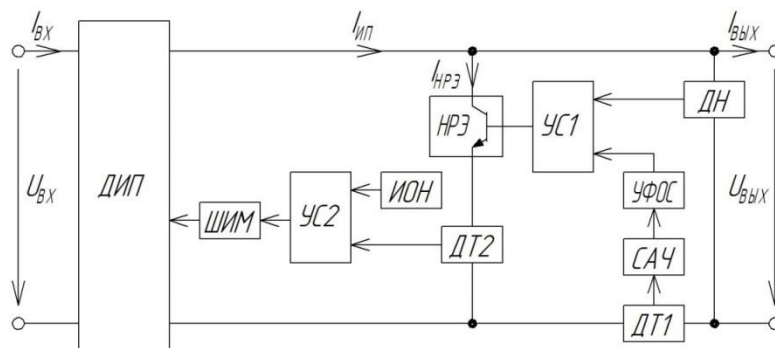


Fig. 3. Lithium-ion-battery simulator structure:

BPC – bi-directional pulse converter; PWM – pulse width modulation; SA – summing amplifier; Vref – voltage reference; ACE – analogue control element; FFD – functional feedback; VD – voltage divider; CS – current sensor, AHC – amp hours counter

Рис. 3. Структурная схема ИАБ:

ДИП – двунаправленный импульсный преобразователь; ШИМ – широтно-импульсный модулятор; УС – усилитель-сумматор; ИОН – источник опорного напряжения; ДТ – датчик тока; НРЭ – непрерывный регулирующий элемент; ДН – датчик напряжения; УФОС – устройство функциональной обратной связи; САЧ – счетчик ампер-часов

Нагрузочное устройство рекуперативного типа. Основу НУРТ (рис. 4) составляет НСТ с параллельным включением НРЭ. НСТ состоит из следующих устройств: НРЭ, УС1, ДТ1. Для воспроизведения требуемых нелинейных вольтамперных характеристик имитируемой нагрузки, НСТ охвачен функциональной обратной связью по напряжению (УФОС). Применение импульсного стабилизатора тока (ИСТ), протекающего через НРЭ, позволяет

ограничить мощность рассеиваемую НРЭ. ИСТ состоит из следующих устройств: ИП, ШИМ, УС2, ДТ2, ИОН.

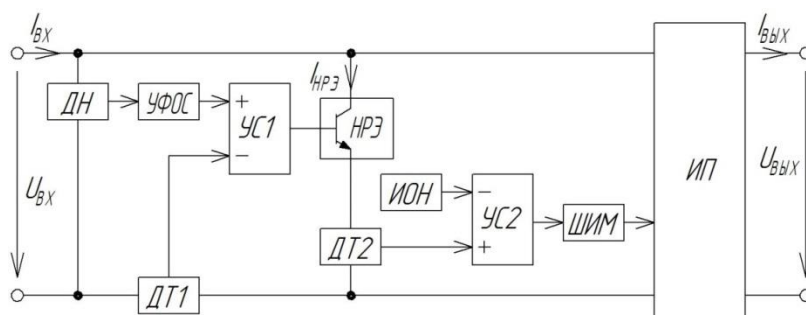


Fig. 4. Structure of load device with energy recuperation:

PC – converter; PWM – pulse width modulation; SA – summing amplifier; Vref – voltage reference; ACE – analogue control element; FFD – functional feedback; VD – voltage divider, CS – current sensor

Рис. 4. Структурная схема НУРТ:

ДН – датчик напряжения; ДТ – датчик тока; УФОС – устройство функциональной обратной связи; УС – усилитель-сумматор; НРЭ – непрерывный регулирующий элемент; ИОН – источник опорного напряжения; ШИМ – широтно-импульсный преобразователь; ИП – импульсный преобразователь

Принцип работы НУРТ: УС1 сравнивает напряжение с ДТ1, пропорциональное входному току НУРТ, с напряжением на выходе УФОС и формирует сигнал управления для НРЭ. УФОС вырабатывает уставку для НСТ в соответствии с заданной ВАХ и текущим значением напряжения, измеренным ДН. УС2 сравнивает напряжение, пропорциональное току через НРЭ, полученное с ДТ2, с опорным и формирует управляющий сигнал для ИП, пропорциональный отклонению действующего значения тока через НРЭ от требуемого значения.

Энергосберегающий имитационно-натурный комплекс Разработанный авторами ЭИНК (рис. 5) содержит: ИСБ, ИАБ, НУРТ, быстродействующее устройство защиты (БУЗ), специализированный аппаратно-программный комплекс (АПК). В состав модуля ИБС входит 4 независимых канала, допускающих параллельное, последовательное соединение двух каналов и смешанное соединение. Каждый канал обеспечивает: изменение напряжения холостого хода от 20 до 200 В; изменение тока короткого замыкания от 0,1 до 7 А; задание формы ВАХ математически, таблицей, наклонными для ветвей напряжения и тока и зоной нелинейного перехода; изменение выходной емкости от 500 до 1000 нФ с шагом 100 нФ.

В состав модуля имитатора литий-ионных аккумуляторных батарей (ЛИАБ) входят блоки: имитации зарядно-разрядных характеристик ИАБ; имитации изменения аналоговых датчиков напряжения каждого аккумулятора; имитации аналоговых датчиков температуры. Модуль ИАБ обеспечивает: изменение напряжения от 10 до 105 В; изменение тока заряда от 0 до 25 А; изменение тока разряда от 0 до 70 А; задание формы ЗРХ математически, таблицей; изменение активной составляющей внутреннего сопротивления от 5 мОм до 50 мОм, индуктивной составляющей – от 8 мкГн, до 80 мкГн.

Модуль НУРТ содержит 4 независимых канала, допускающих параллельное, последовательное соединение двух каналов и смешанное соединение. НУРТ обеспечивает: максимальную мощность канала 1500 Вт; изменение напряжения от 20 до 120 В; изменение тока от 0,1 до 20 А; наведение гармонических помех амплитудой 5 А в полосе до 300 кГц.

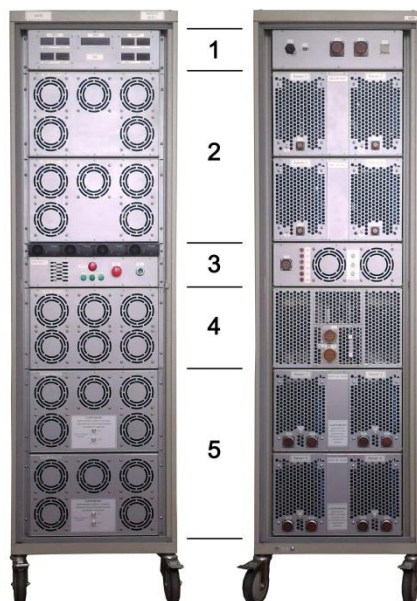


Fig. 5. ESAST:

1 – Hardware and software complex; 2 – Four SAS channels; 3 – PS; 4 – LibS; 5 – four LDER channels

Рис. 5. Внешний вид ЭИНК:

1 – АПК; 2 – четыре канала ИБС; 3 – источник электропитания; 4 – ИАБ; 5 – четыре канала НУРТ

Для подтверждения эффективности экспериментальных образцов основных подсистем ЭИНК проведен сравнительный анализ технических и ценовых характеристик подсистем ЭИНК модульного типа с характеристиками подсистем зарубежных компаний [7–9] и подсистем энергосберегающих испытательных комплексов производства НИИАЭМ-ТУСУР [10–12], г. Томск, лидера в производстве испытательной техники для космических аппаратов в РФ.

Следует отметить, что основные преимущества разработанного ЭИНК с рекуперацией избыточной электроэнергии в сеть постоянного тока системы электроснабжения комплекса состоят в следующем:

- возможность уменьшения мощности источника электропитания комплекса минимум в два раза;
- сохранение работоспособности и увеличении длительности работы от источника бесперебойного питания при отключении промышленной сети переменного напряжения;
- существенное уменьшение массы и габаритов составных частей ЭИНК.

В табл. 1 приведены технические характеристики имитаторов литий-ионных аккумуляторных батарей: БИАБ -200ЛИ [10], производства НИИАЭМ –ТУСУР, г.Томск; ИАБ с параллельным соединением двух модулей, производства СибГУ, г. Красноярск и имитатор аккумуляторной батареи производства компании «АМТЕК» [7], США.

Таблица 1

Энергетические и массогабаритные характеристики имитаторов литий-ионных аккумуляторных батарей

№	Параметр	Размерность	БИАБ-200ЛИ ТУСУР	ИАБ СибГУ	Battery String Simulator, Ametek
1	Диапазон зарядного/ разрядного напряжения	В	40–110	10–120	120
2	Максимальная мощность в	Вт	12000	14700	18000

	режиме разряда				
3	Дискретность регулировки зарядного/разрядного напряжения	В	0,1	0,1	Нет данных
4	Размах пульсаций выходного напряжения, не более	мВ	50	500	Нет данных
5	Максимальный зарядный ток	А	30	50	50
6	Максимальный разрядный ток	А	200 при напряжении не более 60В. 109 при напряжении 110В	140 во всём диапазоне напряжений	150
7	Имитация зарядно/разрядных характеристик	---	нет	да	нет
8	Рекуперация в режиме заряда	---	нет	да	нет
9	Имитация датчиков напряжения	---	да	да	да
10	Имитация датчиков температуры	---	да	да	да
13	Удельный объем	м ³ /Вт	$79,56 \times 10^{-6}$	$16,46 \times 10^{-6}$	$114,76 \times 10^{-6}$
14	Удельная масса	кг/Вт	$33,33 \times 10^{-3}$	$8,84 \times 10^{-3}$	$31,25 \times 10^{-3}$

Из табл. 1 следует, что по основным техническим характеристикам ИАБ разработки СибГУ находится на уровне аналогов, а по массогабаритным характеристикам опережает аналоги.

В табл. 2 приведены технические характеристики имитаторов солнечных батарей сопоставимых по мощности: ИБС-200/7-4 [11], производства НИИАЭМ –ТУСУР, г. Томск; ИСБ-200-4К с параллельным соединением двух модулей, производства СибГУ, г. Красноярск и E4360 Keysight Technologies [8] с параллельным соединением четырёх модулей, содержащих восемь каналов.

Из табл. 2 видно, что ИБС разработки СибГУ по техническим характеристикам и функциям назначения занимает промежуточное положение между ИБС производства ТУСУР и Keysight Technologies. К недостаткам ИБС производства Keysight Technologies следует также отнести большую мощность тепловыделений при работе на токовой ветви ВАХ, недостаточную крутизну ВАХ на ветви напряжения, определяемую величиной последовательного сопротивления RS, недостаточно большое напряжение холостого хода-170В.

Таблица 2

Энергетические и массогабаритные характеристики имитаторов солнечных батарей

№	Параметр	Размерность	ИБС-200/7-4 ТУСУР	ИСБ-200-4К СибГУ	E4360 Keysight Technologies
1	Диапазон регулирования U_{xx}	В	40 -210	20-210	20–170
2	Дискретность регулировки	В	0,1	0,1	0,048
3	Диапазон регулировки тока $I_{kз}$ одного канала	А	0-8	0–7	0–3,8
4	Дискретность регулировки тока $I_{kз}$	А	0,01	0,01	0,0012

5	Погрешность воспроизведения ВАХ, не более	%	5	2	Нет данных
6	Полоса частот воспроизведения адмитанса	Гц	Нет данных	100000	Нет данных
7	Погрешность воспроизведения адмитанса, не более	%	Нет данных	5	Нет данных
8	Сопротивление последовательное минимальное R_s	Ом	0,3	0,3	1,72
9	Удельный объем	м ³ /Вт	$87,71 \times 10^{-6}$	$43,20 \times 10^{-6}$	$30,36 \times 10^{-6}$
10	Удельная масса	кг/Вт	$32,74 \times 10^{-3}$	$16,43 \times 10^{-3}$	$14,75 \times 10^{-3}$

В табл. 3 приведены технические характеристики сопоставимых по мощности имитаторов нагрузочных устройств: БИН-100 [12], производства НИИАЭМ-ТУСУР, г.Томск; НУК-120-4К с параллельным соединением двух модулей, производства СибГУ, г. Красноярск и EA-ELR 9250-70 Elektro-Automatik [9], ФРГ.

Нагрузочные устройства производства Elektro-Automatik имеют хорошие массогабаритные характеристики, но вызвано это тем, что, вследствие применения импульсных преобразователей, функция наведения тестовых синусоидальных и импульсных токов на шинах источников электропитания ограничена полосой частот, не превышающей нескольких килогерц. Для исследований помехоустойчивости и измерения импедансных частотных характеристик источников электропитания необходимо увеличение полосы частот до сотен килогерц, при этом требуется применение нагрузочных устройств непрерывного типа, что существенно ухудшает массогабаритные характеристики устройств. Это видно на примере нагрузочных устройств производства ТУСУР и СибГУ им. М.Ф. Решетнева.

Таблица 3

Энергетические и массогабаритные характеристики нагрузочных устройств рекуперативного типа

№	Параметр	Размерность	БИН-100 ТУСУР	НУК-120-4К СибГУ	EA-ELR 9250-70 Elektro-Automatik
1	Максимальное входное напряжение	В	100	120	250
2	Диапазон входного тока	А	0-65	0-80	0-70
3	Дискретность регулировки	А	0,01	0,01	Нет данных
4	Размах синусоидального тестового тока нагрузки	А	0-15	0-16	Нет данных
5	Дискретность регулировки	А	0,1	0,1	Нет данных
6	Диапазон частот тестового сигнала	кГц	0,02-100	0-300	Нет данных
7	Имитация нагрузки постоянного сопротивления	---	нет	да	да
8	Имитация нагрузки постоянной мощности	---	нет	да	да
9	Рекуперация избыточной энергии	---	В промышленную сеть	В сеть постоянного тока испытательного	В промышленную сеть переменного напряжения

			переменного напряжения	комплекса	
10	Возможность работы при отключении промышленной сети переменного напряжения	---	Нет без дополнительных устройств	да	нет
11	Удельный объем	м ³ /Вт	90,68x10 ⁻⁶	40,32x10 ⁻⁶	22,36x10 ⁻⁶
12	Удельная масса	кг/Вт	33,85x10 ⁻³	18,33x10 ⁻³	9,72x10 ⁻³

Заключение. По большинству параметров разработанные СибГУ основные подсистемы ЭИНК находятся на уровне технических характеристик мировых производителей, а по ряду функций назначения превосходят их. В частности, это касается динамических свойств: полосы частот воспроизведения импеданса АБ, адмитанса СБ, диапазона частот наведения тестового тока синусоидальной формы НУРТ, коэффициента использования электроэнергии.

References

1. Keysight E4350B, E4351B Modular Solar Array Simulators Datasheet. Available at: <https://www.keysight.com/ru/pc-1000000530%3Aeapsg%3Aapgr/e4350b-e4351bsolar-array-simulators?nid=-32610.0.00&cc=RU&lc=rus> (accessed 02.03.2020).
2. Elgar Solar Array Simulator. Available at: <https://www.powerandtest.com/power/engineeredsystems/solar-array-simulator> (accessed 02.03.2020)
3. Haeblerlin H. et al. Development of a fully automated PV array simulator of 100 kW. *23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Valencia, Spain, Sept. 2008
4. Martín-Segura G. et al. Development of a photovoltaic array emulator system based on a full-bridged structure. *Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU) 9th International Conference on*. 2007, Vol. 4, Iss. 2, P. 1–6.
5. Mizrakh E. A., Balakirev R. V., Lobanov D. K., S. B. Tkachev, A. S. Fedchenko. *Kompleks dlya nazemnykh ispytaniy sistem elektropitaniya kosmicheskikh apparatov* [Groundbased test complex for spacecraft power supplies tests]. Patent RF, no. 159208, 2016.
6. Mizrakh E. A., Balakirev R. V., Lobanov D. K., Shtabel' N. V., Poymanov D. N. *Elektricheskiy imitator akkumulyatornoy batarei s zashchitoy po toku i napryazheniyu i ustroystvo zashchity elektricheskogo imitatora akkumulyatornoy batarei* [Electric battery simulator with current and voltage protection and protection device for electric battery simulator]. Patent RF, no. 2635897, 2017.
7. Elgar Battery String Simulators. Available at: <https://www.powerandtest.com/power/engineeredsystems/battery-string-simulator> (accessed 02.03.2020)
8. Keysight E4360 Modular Solar Array Simulators. Available at: <https://www.keysight.com/ru/pc-1367756/e4360-modular-solar-array-simulators?pm=LB&nid=-34612.0&c=181710.i.1&to=79830.g.0&cc=RU&lc=rus> (accessed 02.03.2020)
9. Keysight E4360 Modular Solar Array Simulators. Available at: <https://www.keysight.com/ru/pc-1367756/e4360-modular-solar-array-simulators?pm=LB&nid=-34612.0&c=181710.i.1&to=79830.g.0&cc=RU&lc=rus> (accessed 02.03.2020)
10. *Nauchno-issledovatel'skiy institut avtomatiki i elektromekhaniki TUSUR. Blok imitatsii lityonnoy akkumulyatornoy batarei BIAB-200LI* [Research Institute of Automatics and Electromechanics TUSUR. The simulation unit of the lithium-ion battery BIAB-200LI]. Available at: <http://niiuem.tomsk.ru/product/biab/biab-200li.html> (accessed 02.03.2020).

11. *Nauchno-issledovatel'skiy institut avtomatiki I elektromekhaniki TUSUR* [Research Institute of Automatics and Electromechanics TUSUR.]. Available at: <http://niiam.tomsk.ru/product/ibs/ibs-200.htm> (accessed 02.03.2020).

12. *Nauchno-issledovatel'skiy institut avtomatiki I elektromekhaniki TUSUR. Blok imitatsii nagruzki BIN-100* [Research Institute of Automatics and Electromechanics TUSUR. Load Simulation Unit BIN-100]. Available at: <http://niiam.tomsk.ru/product/in/bin-100.html> (accessed 02.03.2020).

Библиографические ссылки

1. Keysight E4350B, E4351B Modular Solar Array Simulators Datasheet [Электронный ресурс]. URL: <https://www.keysight.com/ru/pc-1000000530%3Ae4350b-e4351b-solar-array-simulators?nid=-32610.0.00&cc=RU&lc=rus>. (дата обращения 02.03.2020).

2. Elgar Solar Array Simulator [Электронный ресурс]. URL: <https://www.powerandtest.com/power/engineered-systems/solar-array-simulator> (дата обращения 02.03.2020).

3. Development of a fully automated PV array simulator of 100 kW / H. Haeberlin, L. Borgna, D. Gfeller, P. Schaerf, U. Zwahlen // 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, Spain, Sept. 2008

4. Development of a photovoltaic array emulator system based on a full-bridged structure / G. Martín-Segura, J. López-Mestre, M. Teixidó-Casas, A. Sudrià-Andreu // Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU) 9th International Conference on. 2007. Vol. 4, Iss. 2. P. 1–6.

5. Пат 159208 РФ. МПК G01R 31/00. Комплекс для наземных испытаний систем электропитания космических аппаратов / Мизрах Е. А., Балакирев Р. В., Лобанов Д. К., Ткачев С. Б., Федченко А. С. (RU) № 2015145047/28 ; заяв. 20.10.15 ; опубл. 10.02.16, Бюл. No 4.

6. Пат 2635897 РФ. МПК G06G 7/48. Электрический имитатор аккумуляторной батареи с защитой по току и напряжению и устройство защиты электрического имитатора аккумуляторной батареи / Мизрах Е. А., Лобанов Д. К., Пойманов Д. Н., Балакирев Р. В., Копылов Е. А., Штабель Н. В. (RU) № 20161489828 ; заяв. 13.12.16 ; опубл. 16.11.17, Бюл. No 32.

7. Elgar Battery String Simulators [Электронный ресурс]. URL: <https://www.powerandtest.com/power/engineeredsystems/battery-string-simulator> (дата обращения 02.03.2020).

8. Keysight E4360 Modular Solar Array Simulators [Электронный ресурс]. URL: <https://www.keysight.com/ru/pc-1367756/e4360-modular-solar-array-simulators?pm=LB&nid=-4612.0&c=181710.i.1&to=79830.g.0&cc=RU&lc=rus> (дата обращения 02.03.2020).

9. Keysight E4360 Modular Solar Array Simulators [Электронный ресурс]. URL: <https://www.keysight.com/ru/pc-1367756/e4360-modular-solar-array-simulators?pm=LB&nid=-34612.0&c=181710.i.1&to=79830.g.0&cc=RU&lc=rus> (дата обращения 02.03.2020).

10. Научно-исследовательский институт автоматики и электромеханики ТУСУР. Блок имитации литийионной аккумуляторной батареи БИАБ-200ЛИ. [Электронный ресурс]. URL: <http://niiam.tomsk.ru/product/biab/biab-200li.html> (дата обращения 02.03.2020).

11. Научно-исследовательский институт автоматики и электромеханики ТУСУР. [Электронный ресурс]. URL: <http://niiam.tomsk.ru/product/ibs/ibs-200.htm> (дата обращения 02.03.2020).

12. Научно-исследовательский институт автоматики и электромеханики ТУСУР. Блок имитации нагрузки БИН-100 [Электронный ресурс]. URL: <http://niiam.tomsk.ru/product/in/bin-100.html> (дата обращения 02.03.2020).

Lobanov Dmitriy Konstantinovich – Cand. Sc., Automatic control systems department assistant professor; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: u649@yandex.ru.

Mizrah Enis Avrumovich – Cand. Sc., Automatic control systems department professor; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: enis-home@mail.ru.

Samotik Lyudmila Arkad'evna – postgraduate student, engineer; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: antikodona@gmail.com.

Tkachev Stepan Borisovich – master student, lead engineer; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: steep_st@mail.ru.

Shtabel Nikolay Vladimirovich – master student, lead engineer; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: shtabnik@gmail.com.

Лобанов Дмитрий Константинович – кандидат технических наук, доцент кафедры систем автоматического управления; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: u649@yandex.ru

Мизрах Енис Аврумович – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры систем автоматического управления; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: enis-home@mail.ru.

Самотик Людмила Аркадьевна – аспирант, инженер научно-исследовательского управления; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: antikodona@gmail.com.

Ткачев Степан Борисович – магистрант, ведущий инженер; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: antikodona@gmail.com.

Штабель Николай Владимирович – магистрант, ведущий инженер; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: shtabnik@gmail.com.